

PACS numbers: 42.62.Cf, 61.80.Ba, 61.82.-d, 79.20.Ds, 81.15.Fg, 81.16.Mk, 81.40.Wx

Форми отоплення поверхні твердого тіла під дією імпульсного лазерного випромінення

Л. В. Породько, А. Б. Демчишин*

*Институт хімії поверхні ім. О. О. Чуйка НАН України,
вул. Генерала Наумова, 17,
03164 Київ, Україна*

**Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
фізичний факультет,
кафедра фізики металів,
просп. Акад. Глушкова, 4^а,
03187 Київ, Україна*

Розглянуто уявлення про взаємодію інтенсивних імпульсних потоків світлової енергії з поверхнею речовини, в тому числі з руйнуванням поверхні. Задача полягає в прогнозуванні критичних параметрів впливу лазерного випромінення на властивості приповерхневих твердих матеріалів (модифікація поверхні, топлення, випаровування, зварювання, різання та ін.), що експлуатуються в широкому діапазоні — від низькоенергетичної і тривалої до високоенергетичної і короткої — радіаційної дії.

The notions are considered concerning the interaction of high-pulsed fluxes of light energy with a matter surface, including the surface deterioration. A problem consists in the prognostication of critical parameters of the laser-radiation impact on properties of solid materials (modification of surfaces, surface melt, laser-induced evaporation, laser welding, laser cutting, etc.), which are operated in a wide range from the low-energy and long-term radiation exposures to the high-energy and short-term ones.

Рассмотрены представления о взаимодействии интенсивных импульсных потоков световой энергии с поверхностью вещества, в том числе с разрушением поверхности. Задача заключается в прогнозировании критических параметров воздействия лазерного излучения на свойства приповерхностных твёрдых материалов (модификация поверхности, плавление, испарение, сварка, резка и др.), которые работают в широком диапазоне — от низкоэнергетического и длительного до высокоэнергетического и короткого — радиационного воздействия.

Ключові слова: низькоенергетичні та високоенергетичні світлові імпуль-

си фемтосекундної тривалості, наносекундний імпульс, отоплення, кра-тери.

(Отримано 6 жовтня 2011 р.)

1. ВСТУП

Розробки лазерних технологій обробки матеріалів в умовах вакууму та газових середовищ (модифікація поверхні, топлення, випаровування, зварювання, різання та ін.) призвели до появи потужних лазерів, що працюють у широкому діапазоні — від низькоенергетичних та тривалих (в медицині) до високоенергетичних та коротких (10^{16} Вт/см² з довжиною імпульсу 10–1000 фемтосекунд; $1 \text{ фс} = 10^{-15}$ с) [1–3].

Технології спрямовують свої дослідження в область усе більш високих лазерних потужностей та все більш коротких імпульсів. Тому постає задача, що пов'язана з теоретичним прогнозуванням наслідків потужного лазерного випромінення на поверхню речовини, і, перш за все, задача визначення критичних параметрів впливу випромінення на властивості твердих матеріалів. Задача такого прогнозування і визначення критичних параметрів є актуальною для уникнення незворотніх змін властивостей матеріалів — руйнування оптичних елементів (дзеркал, оптичних покриттів тощо), що перебувають тривалий час під впливом потужного лазерного випромінення (особливо імпульсно-періодичного). Для вибору оптимальних режимів лазерної обробки матеріалів і створення стійких до впливу лазерного випромінення оптичних елементів існує необхідність у знанні механізмів, що викликають незворотні зміни під впливом лазерного опромінення [4, 6].

За допомогою дзеркальних оптичних систем лазерний промінь можна спрямовувати у важкодоступні місця, передавати на значні віддалі без втрат енергії. Слід мати на увазі, що з підвищенням температури у твердому тілі активізується ряд процесів, які призводять до зміни його фізичних властивостей, зокрема, теплоємності, густини та ін.

Основними характеристиками імпульсного лазерного випромінення, що використовуються для визначення стійкості матеріалів до імпульсного впливу, є інтенсивність, тривалість і форма імпульсу.

В неперервному режимі лазерна стійкість визначається як сукупність двох характеристик: інтенсивності випромінення та тривалості опромінення до виникнення пошкоджень.

Пошкодження поверхні досліджуваного елемента відбувається внаслідок комплексного впливу, принаймні, трьох факторів: власне лазерного випромінення, плазми, що утворюється при руйну-

ванні матеріялу, та безпосереднього контакту як твердого тіла, так і ударних хвиль плазмового факела з імпульсом випромінення [2, 5].

2. МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження процесів, що супроводжують вплив лазерного випромінення на поверхню речовини, виконуються в багатьох напрямках. Але загалом досліджуються (в основному експериментально) особливості або окремих речовин, що опромінюються (кремній [10], алюміній [2], сталь [3], графіт [11], титан [12], срібло [13], мідь [14], алмаз [15]), або імпульсний вплив, обмежений по енергії імпульсів різної тривалості [2, 3]. Велику кількість робіт присвячено дослідженням наслідків впливу імпульсів різної тривалості [10]. В результаті розрахунків одержано деякі закономірності, що дають певне підґрунтя для теоретичних досліджень, які змогли б, з одного боку, об'єднати відомі результати, а з іншого, допомогти зрозуміти від чого ж саме залежить поведінка речовини в екстремальних умовах, які саме імпульси (їх потужність і довжина) більш вигідні в кожному окремому випадку та які характеристики речовини є вирішальними в процесі руйнування.

Дуже багато робіт виконуються для виявлення закономірностей поведінки оптичних матеріялів [6]. У результаті експериментального дослідження міцності матеріялів силової ІЧ-оптики виділено кореляцію порогів пошкодження матеріялів по інтенсивності випромінення з коефіцієнтами заломлення та відбиття [6]. Встановлено, що такі пороги пошкодження матеріялів пропорційні $(n+1)^2 / 4n^2$ або $(1+\sqrt{R})^{-2}$, де n , R — коефіцієнти заломлення та відбиття на гранях. Такі результати для оптичних кристалів узгоджуються з експериментальними значеннями порогів пошкодження поверхні йонних і напівпровідникових кристалів та металодзеркал в області високих значень коефіцієнтів відбиття ($> 0,1$) і заломлення ($> 1,5$) [6]. Матеріяли з величинами коефіцієнтів відбиття $< 0,1$ і заломлення $< 1,5$, тобто досить прозорі для даного випромінення, мають пороги пошкодження поверхні тим вищі, чим більшою є величина ширини забороненої зони.

В 60-х роках минулого століття в оптиці оперували імпульсами наносекундної тривалості (10^{-9} с), що дозволяло досліджувати процеси з характерною тривалістю в десятки й сотні наносекунд. В наступні десятиліття були розвинені способи генерувати пікосекундні (10^{-12} с) та фемтосекундні (10^{-15} с) імпульси. Це відкрило можливість вивчати коливний і обертальний внутрішньомолекулярні рухи, динаміку носіїв у напівпровідниках (і напівпровідникових наноструктурах), фазові переходи у твердих тілах, формування й розрив хемічних зв'язків тощо. Стало можливим за допомогою імпульсів малої тривалості вивчати динаміку швидких процесів, що відбу-

ваються з атомами в молекулах і твердих тілах.

До кінця 1990-х років було відпрацьовано техніку генерації гранично коротких фемтосекундних імпульсів (тривалістю порядку 5 фс) [8]. Одержання ще більш коротких імпульсів аттосекундної тривалості (10^{-18} с) в силу фундаментальних обмежень лінійної фізики вже не дозволяє залишатися в ближньому інфрачервоному або оптичному діапазонах хвиль. Для цього виникає потреба використання жорсткого ультрафіолету — м'якого Рентгенового випромінювання.

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Сучасне покоління лазерів і лазерних систем дозволяє одержувати імпульси фемтосекундної тривалості. Фокусування світлового імпульсу з тривалістю 10–1000 фс дає можливість одержати інтенсивність у діапазоні від 10^{14} до 10^{21} Вт/см² [1].

Для з'ясування основних якісних рис процесу оптичного нагрівання речовини в багатьох випадках виявляється достатнім змодельювати неперервне лазерне випромінювання Хевісайдовою ступеневою функцією:

$$f\left(\frac{t}{\tau_p}\right) = H(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 1, & t \geq 0, \end{cases} \quad (1)$$

а імпульсне — прямокутною обвідною інтенсивності:

$$f\left(\frac{t}{t_p}\right) = \frac{H(t) - H(t - t_p)}{t_p}. \quad (2)$$

У граничному випадку, коли $t_p \rightarrow \infty$, одержуємо миттєвий імпульс, який звичайно задають за допомогою δ -функції, тобто $f(t/t_p) = \delta(t)$. Цікавим з практичної точки зору є імпульс, інтенсивність якого швидко зростає до моменту часу t_p , а потім повільно спадає. Такі імпульси генерують з метою уникнення швидкого охолодження тіла, і їх можна задати, наприклад, формулою:

$$f\left(\frac{t}{t_p}\right) = \begin{cases} \left(\frac{t}{t_p}\right)^n, & t < t_p; \\ \exp[-b(t - t_p)], & t > t_p. \end{cases} \quad (3)$$

Імпульси високої інтенсивності і відповідної тривалості, потрапляючи на поверхню твердої речовини, призводять до суттєвих змін цієї поверхні, що викликає особливу зацікавленість [5]. На ри-

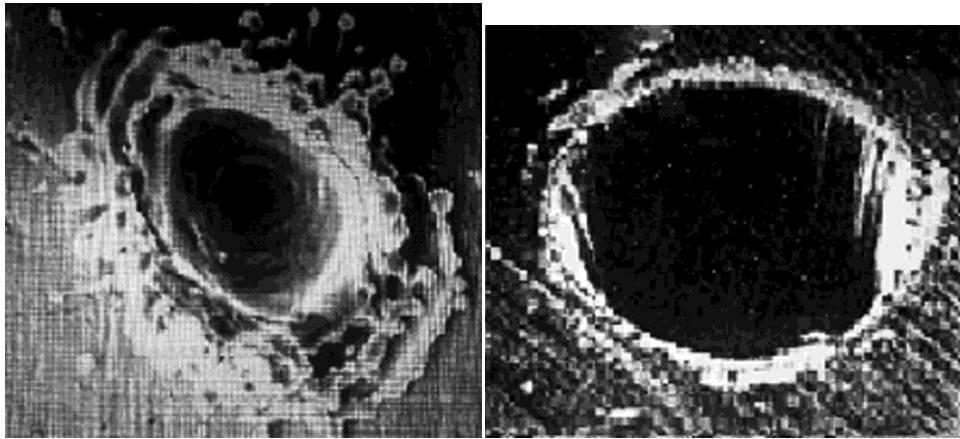


Рис. 1. Кратер діаметром 100 мікрометрів, просвердлений у сталі лазерним імпульсом (наносекундним зліва та фемтосекундним праворуч) [3].

сунку 1 наведено приклад такої обробки. Як видно, кратери, створені лазерним імпульсом, відрізняються за своєю формою.

Суттєво те, що руйнування поверхні може відбуватися як з отопленням країв кратера, так і без отоплення. В [3] стверджується, що існує прямо пропорційна залежність між тривалістю імпульсу та виглядом кратера, а саме, мірою отоплення його країв. З рисунку 1 видно, що кратер, створений наносекундним імпульсом, має більш отоплені краї, ніж кратер, просвердлений фемтосекундним імпульсом (10^{-15} с).

У роботі [7] наведено результати (рис. 2), з яких видно, що не все залежить від тривалості імпульсу.

Результати цих експериментів указують на те, що наявність або

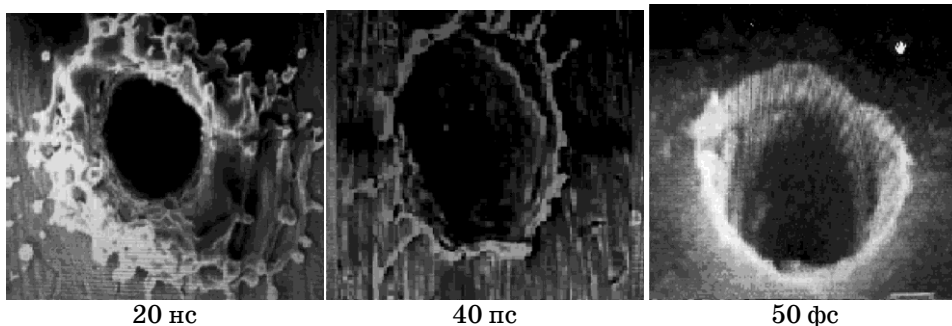


Рис. 2. Кратери, що просвердлені імпульсами з довжинами 20 нс, 40 пс та 50 фс в алюмінієвих зразках. Енергія імпульсу — 2,7 мкДж/імпульс. Для обробки використовувалися «пакети» по 3 імпульси [7].

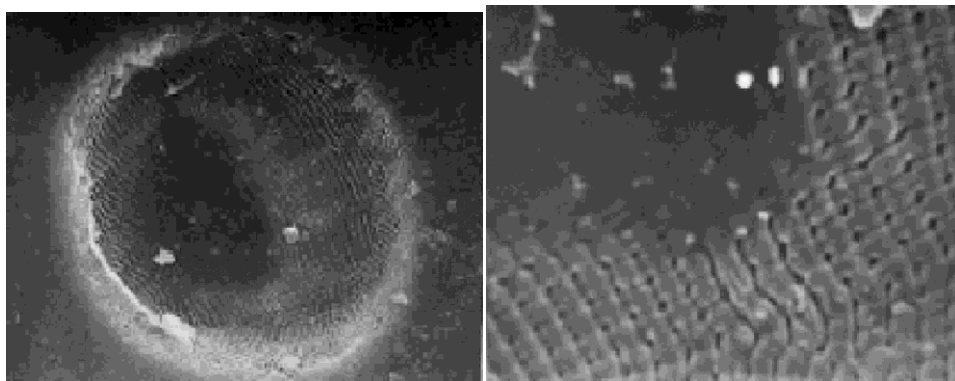


Рис. 3. Структура граней кратера, утвореного дією 25 імпульсів випромінювання з довжиною в 5 фс та енергією $6,9 \text{ Дж/см}^2$ у кварці [8].

відсутність отоплення кратера суттєво залежить не тільки від тривалості падаючого на поверхню імпульсу, але й від його інтенсивності.

Не зважаючи на різницю між кратерами, видно, що в обох випадках (як для рис. 1, так і для рис. 2) імпульси фемтосекундної тривалості не дають отоплених країв.

Проте, виходячи з експериментальних досліджень, виконаних у роботі [8], можна бачити (рис. 3), що, хоча отоплених країв у випадку обробки матеріялу фемтосекундними імпульсами немає, на стінках свердловини отоплення має місце навіть при дуже коротких довжинах імпульсів у 5 фс. Цей факт говорить про те, що процеси, які відбуваються при руйнуванні поверхні над короткими лазерними імпульсами, все ж таки можна розглядати на основі уявлень про суцільне середовище.

4. ВИСНОВКИ

Питанням, що пов'язані з руйнуванням поверхні короткими лазерними імпульсами великої інтенсивності, присвячено велику кількість експериментальних та теоретичних досліджень. В останні роки зростає інтерес до використання дуже коротких імпульсів [7]. У зв'язку із цим виникає необхідність дослідження процесів, що відбуваються при взаємодії коротких лазерних імпульсів із плазмою, яка виникає при опроміненні матеріялу. На формування плазми, в свою чергу, істотно впливає структура та властивості поверхневого шару цілі. Факторами, що можуть впливати на розвинення процесу можуть бути гладкість або шерсткість поверхні [9], поруватість [2], поглинальна здатність речовини.

Не зважаючи на велику кількість експериментальних робіт у цій

області, фізика процесів, що відбуваються при опромінюванні речовини, залишається незрозумілою [3]. Як правило, роботи, яких присвячено вивченню впливу лазерного випромінення на речовину, є експериментальними. Роботи теоретичного напрямку стосуються здебільш не поведінки речовини, що опромінюється, а вивчення властивостей плазми, яка виникає при руйнуванні поверхні, причому роботи з дослідження процесів руйнування поверхні — це роботи переважно обчислювального характеру.

Отже, теоретичні моделі, що використовуються для інтерпретації поведінки речовини в екстремальному стані, базуються на припущенні, що фазовий стан досліджуваного матеріалу не змінюється впродовж усього процесу лазерної обробки, а можливість швидких якісних змін ігнорується. Урахування кінетики подібних змін, тобто локальних фазових перетворень, є суттєвим.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Р. В. Волков, В. М. Гордиенко, Д. М. Голишников, *Письма ЖЭТФ*, № 77: 568 (2003).
2. А. Б. Савельев-Трофимов, *Управление свойствами плотной плазмы фемтосекундного лазерного импульса и иницирование низкоэнергетических ядерных процессов* (Дисс. ... д-ра физ.-мат. н.; 01.04.21) (Москва: МГУ: 2003).
3. D. Hulin, *Rapport sur la Science et la Technologie No. 09 l'Academie des Sciences 'Sciences aux Temps Ultracourts (de l'Attoseconde aux Petawatts)'* (Londres-Paris-New York: 2000), p. 197.
4. С. Г. Казанцев, *Оптика атмосферы и океана*, **16**, № 4: 390 (2003).
5. J. C. Gauthier, *Rapport sur la Science et la Technologie No. 09 l'Academie des Sciences 'Sciences aux Temps Ultracourts (de l'Attoseconde aux Petawatts)'* (Londres-Paris-New York: 2000), p. 225.
6. С. Г. Казанцев, *Перспективные материалы проходной оптики мощных ИК лазеров*, <http://www.uniphys.ru/journal/N1-05/toparticle/toparticle.htm>.
7. X. Zhu, A. Yu. Naumov, and D. M. Villeneuve, *Appl. Phys. A*, **69**, Suppl.: 367 (1999).
8. M. Lenzner, *Int. J. Mod. Phys. B.*, **13**, No. 13: 1559 (1999).
9. J. Tadano, H. Kumakura, and Y. Ito, *Appl. Phys. A.*, **79**, Nos. 4-6: 1031 (2004).
10. Y. C. Lam, D. V. Tran, and H. Y. Zheng, *Surf. Rev. Lett.*, **11**, No. 2: 217 (2004).
11. M. B. Agranat, S. I. Ashitkov, and V. E. Fortov, *J. Exp. Theor. Phys.*, **88**, No. 2: 370 (1999).
12. H. Reimer, J. Gold, B. Kasemo, and D. Chakarov, *Appl. Phys. A*, **77**: 491 (2003).
13. B. Toftmann, J. Schou, and N. B. Larsen, *Appl. Phys. A*, **69**: 811 (1999).
14. A. I. Boriskin, V. M. Eremenko, and P. A. Pavlenko, *Tech. Phys.*, **49**, No. 6: 770 (2004).
15. H. Park, Y. K. Hong, and J. S. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, **69**, No. 6: 779 (1996).